

## Анализ данных дрейфующих буйев и буксируемого профилографа течений на подспутниковом полигоне в Черном море

К.П. Сильвестрова<sup>1</sup>, Е.В. Краюшкин<sup>2,3</sup>, С.А. Мысленков<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия*  
*E-mail: ksenia.ocean@yandex.ru*

<sup>2</sup> *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*  
*E-mail: stasocan@gmail.com;*

<sup>3</sup> *Институт космических исследований РАН, Москва, Россия*  
*E-mail: box\_evk@mail.ru*

В работе проанализированы данные о течениях, полученные на экспериментальном подспутниковом полигоне в прибрежной зоне Черного моря в районе г. Геленджик. В ходе экспериментов были запущены лагранжевы дрифтеры с подводным парусом, расположенном на различных глубинах, что позволило провести сравнение результатов измерений с вертикальным профилем течений, полученным при помощи акустического доплеровского профилографа течений (ADCP). При скоростях течения менее 0,1 м/с зафиксировано некорректное измерение буксируемым ADCP направления течения. Проведено качественное сравнение течений, восстановленных по данным сенсоров Modis Terra/Aqua и OLI Landsat-8, с траекториями дрифтеров. Выполнено сопоставление параметров течений, полученных при проведении дрифтерных экспериментов, с результатами численного моделирования, выполненного с помощью программы KUST. Установлено, что скорости течений, рассчитанные по программе KUST, на участках открытого моря хорошо соотносятся с данными наблюдений, однако вихрь, зафиксированный на расстоянии 50 км от берега в районе Крыма, программой воспроизведен не был. Результаты исследования показали невозможность использования программного пакета KUST в прибрежной зоне моря. Единственным источником достоверной информации о параметрах течений в прибрежной зоне по-прежнему остаются данные океанографических экспедиций.

**Ключевые слова:** дрейфующий буй, дрифтер, ADCP, морские течения, Черное море, дистанционное зондирование, спутниковая альтиметрия, AVISO, KUST

### Введение

Мониторинг морских течений в прибрежной зоне Черного моря является важной и актуальной задачей. Течения во многом определяют направление и скорость распространения различных загрязнений, объем которых резко возрос в последние годы в связи с повышенной антропогенной нагрузкой.

Характер течений на шельфе северо-восточной части Черного моря определяются множеством различных природных факторов, среди которых: динамика Основного черноморского течения (ОЧТ), изменчивость поля ветра, ширина шельфа, резкий свал глубин, сложная ортография береговой линии и т.д. (Журбас и др., 2004; Зацепин, Корж и др., 2008; Кривошея и др., 2004; Овчинников, Титов, 2002; Титов, 2002).

Поле течений в этом районе имеет широкие пределы изменчивости как по времени, так и по пространству, и его изучение является весьма сложной задачей. Например, течение со скоростями порядка 30 см/с, наблюдавшееся в течение суток, за несколько часов может изменить направление на противоположное (Зацепин, Кременецкий и др., 2008; Зацепин и др., 2012; Калашникова и др., 2012; Лаврова и др., 2013). Также в Черном море присутствуют вихревые образования различных пространственных масштабов, например, в районе Геленджика часто встречаются небольшие вихри (1–10 км, 1–100 ч), определяющие динамику вод шельфа (Зацепин и др., 2011, 2012). В связи с этим можно наблюдать разнонаправлен-

ные потоки при измерениях в фиксированных точках на расстоянии 500–1000 м (Зацепин и др., 2012; Кривошея и др., 2004; Lavrova et al., 2012).

В настоящее время основным источником информации о течениях в прибрежной зоне являются данные заякоренных акустических доплеровских профилографов течений (ADCP) (Зацепин и др., 2008; Зацепин и др., 2012), но, учитывая широкие масштабы изменчивости течений и невозможность установить самописцы через каждые 500 м даже на акватории 10x10 км, данный метод не позволяет составить полную картину динамики течений. Существует также лагранжев подход, при котором исследуются траектории движения дрейфующих буюв. Результаты использования данного метода для исследования течений в Черном море описаны в работах (Журбас и др., 2004; Мотыжев и др., 2011; Мысленков и др., 2014). Однако подобные эксперименты проводились редко. Результаты сопоставления данных ADCP с траекториями дрейфтеров, отражающих фактическое перемещение воды, приведены в работах (Mullarney, Henderson, 2013; Ruiz et al., 2002; Мысленков и др., 2014), но для Черного моря подобные исследования практически не проводились.

Данные дистанционного зондирования для исследования динамики вод либо представляют собой квазимгновенные сведения о течениях на поверхности (спутниковая альтиметрия), либо отражают косвенные признаки присутствия определенного поля течений (Лаврова и др., 2011). Данные математического моделирования имеют серьезные ограничения в применении, поскольку, как правило, начальные и граничные условия (поле плотности, уровенная поверхность и т. д.) не определены, а также существует предел пространственного разрешения входных данных о приземном ветре. Следовательно, математические модели и данные дистанционного зондирования также не могут дать полного представления о структуре и динамике прибрежных течений без использования данных прямых подспутниковых наблюдений.

Таким образом, для получения полной и достоверной информации о течениях в прибрежной зоне необходимо использовать комплексный подход с применением всех доступных методов. Также необходимо провести оценку достоверности применяемых методов и уточнить пределы их применимости в зависимости от условий региона и поставленной задачи.

В настоящей работе используются данные о течениях, полученные на экспериментальном подспутниковом полигоне в прибрежной зоне Черного моря в районе г. Геленджик (Зацепин и др., 2014). В 2014 году был проведен ряд экспериментов с лагранжевыми дрейфующими буюями (далее дрейфтеры), а также с буксируемым ADCP. К анализу привлекались доступные данные дистанционного зондирования. Траектории движения дрейфтеров сопоставлялись с данными дистанционного зондирования на различных пространственных масштабах изменчивости течений – от 100 м до 300 км.

Цель настоящего исследования – показать возможности использования данных дрейфтеров в качестве подспутниковой информации, а также сопоставить данные о течениях, полученные различными методами: натурных измерений дрейфтерами и ADCP, дистанционного зондирования, численного моделирования с использованием программного комплекса KUST.

## Описание экспериментов

В последние годы для изучения течений в Черном море и в районе Геленджика в частности, успешно используются дрейфтеры, способные нести подводный парус различных размеров и глубины расположения (Tolstosheev, 2010). Для определения своего местоположения дрейфтер оснащен GPS приемником, а для передачи данных используется GSM связь. Подробное описание конструкции дрейфтера приводится в работах (Мотыжев и др., 2011; Мысленков и др., 2014; Мысленков, Самсонов, 2014). Глубина погружения подводного паруса и его площадь определяет слой воды, в котором измеряются параметры течений. Используемая конструкция позволяет получать данные об интегральном течении в интересующем слое.

Экспериментальные запуски серии дрейфтеров проводились 3–4 июля 2014 года синхронно с буксировкой ADCP в районе г. Геленджика на шельфе Черного моря (рис. 1).



*Рис. 1. Фрагмент спутникового изображения района эксперимента, полученного с помощью OLI Landsat-8 28 июня 2014 года. Желтая линия – траектория буксировки ADCP и район запуска дрейфтеров*

Всего было запущено 4 дрейфтера на расстоянии около 150 м друг от друга вдоль галса 3 июля в 10:00–10:20. Паруса были расположены на глубинах 0,5–1,5 м; 4,2–5,2 м; 6,6–7,6 м; 15–16 м (рис. 2). При этом запуск дрейфтера с парусом, расположенном на глубине 15–16 м был произведен первым на расстоянии ~ 1,5 км от берега, а затем при продвижении в мори-

стую часть поочередно произведен запуск оставшихся дрейфтеров по мере уменьшения глубины расположения паруса. Заглубление паруса на разные горизонты позволило провести полноценное сравнение результатов измерений скорости и направления течений с данными ADCP, а также оценить параметры экмановского сдвига скорости с глубиной.

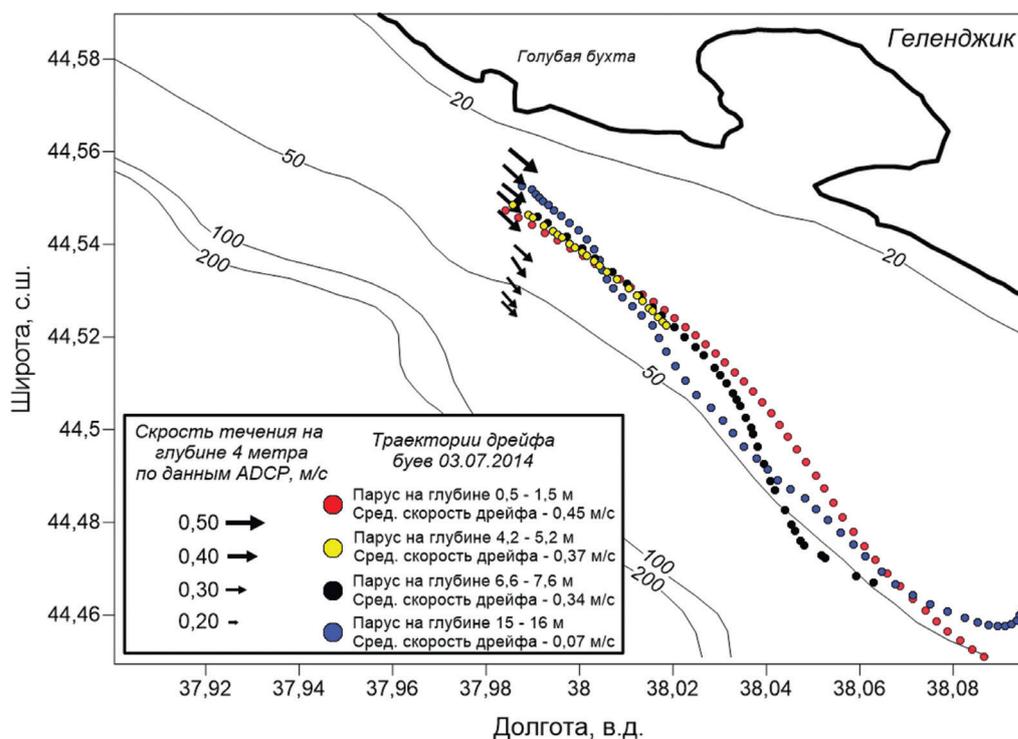


Рис. 2. Дрейфтерный эксперимент 3–4 июля 2014. Траектории движения дрейфтеров, скорость и направление течений по данным ADCP в поверхностном слое на 4 м

Во время буксировки использовался ADCP TRDI WHS 300, жестко прикрепленный к маломерному судну и обеспечивающий измерение вертикальных профилей течений на глубинах до 150 м с дискретностью (ячейкой) 2 м. Центр первой ячейки располагался на глубине 4 м. Профилограф течений производил измерения (ансамбли) с частотой 0,5 Гц, позволяя получить при средней скорости движения судна  $\sim 1,2$  м/с пространственное разрешение измерений вдоль трека  $\sim 3$  м. При дальнейшей обработке данных производилось осреднение компонент течений с окном в 80 ансамблей в пределах глубины каждой ячейки. На выходе стандартное отклонение измеренного вектора течений составляло 0,78 см/с, а пространственное разрешение  $\sim 200$  метров по направлению движения маломерного судна. Вес каждого измерения принимался одинаковым, в пределах окна осреднения, ввиду квазистационарного движения судна в районе эксперимента (Лаврова и др., 2014; Мысленков и др., 2014).

На обратных галсах после проведения буксировки профилографа течений и запуска дрейфтеров, производилось STD-зондирование портативным зондом YSI Cast Away. Описание методики обработки данных STD-зондирования приведено в работе (Лаврова и др., 2014).

Отдельный дрейфтерный эксперимент проведен с 29 сентября по 17 октября 2014 года в открытой части Черного моря. В данном эксперименте подводный парус дрейфтера был распо-

ложен на глубине 3–4 м, передатчик был снабжен дополнительным батарейным блоком, что позволило отслеживать перемещение дрейфтера на протяжении 19 суток (с дискретностью 3 часа). Попад в ОЧТ в начале эксперимента у г. Геленджик (37,983 в.д., 44,546 с.ш.), дрейфтер оказался у берегов Крыма и двигался под влиянием субмезомасштабных вихревых структур.

Траектории движения дрейфтеров и данные ADCP были сопоставлены с траекториями движения виртуальных дрейфтеров, которые были рассчитаны с помощью программного пакета KUST (Stanichny et al., 2015; Матвеев и др., 2015), позволяющего извлекать и визуализировать результаты дрейфа плавучего объекта с использованием данных спутниковой альтиметрии. На данный момент программный пакет KUST является единственной открытой вихреразрешающей численной моделью, позволяющей ассимилировать реальные спутниковые данные. Одной из задач настоящей работы являлась, в частности, оценка работоспособности пакета KUST для прибрежной и открытой части моря. Для расчета дрейфа из архива данных AVISO (<http://www.aviso.oceanobs.com>) получают региональные карты аномалий уровня Черного моря с пространственным разрешением  $1/8^\circ$  и временным – 1 сутки. Для расчета абсолютной динамической топографии по данным об аномалиях уровня к картам аномалий прибавляется заданное поле средней динамической топографии региона (Kubryakov, Stanichny, 2012). Из уравнения геострофического баланса по градиентам абсолютной динамической топографии определяют скорости поверхностных геострофических течений. Далее, используя поля скоростей течения, по схеме Эйлера рассчитываются траектории виртуальных частиц.

### Сравнение результатов измерений течений дрейфтерами и ADCP

На *рис. 2* приведены траектории движения дрейфтеров 3–4 июля 2014 года и данные о течении в поверхностном слое вод, полученные с помощью ADCP. Как показали измерения, дрейфтеры двигались преимущественно в юго-восточном направлении, но с различными скоростями по глубине. Дрейфтер с парусом на глубинах 0,5–1,5 м (продолжительность дрейфа 7,5 часов) двигался со средней скоростью  $\sim 0,45$  м/с, показав наличие сильного течения в прибрежной зоне, противоположного основной струе ОЧТ. С глубиной скорость течения уменьшалась, но оно не меняло своего направления. Дрейфтер с парусом на глубинах 4,2 – 5,2 м (продолжительность дрейфа 3 часа), располагающийся в пределах ячейки ADCP, показал среднюю скорость дрейфа  $\sim 0,37$  м/с. Скорость дрейфа практически полностью совпадала с результатами измерений акустическим профилографом течений в пределах допущений методики измерений буксируемым ADCP (ошибка составляет 0,05 м/сек). Дрейфтер с парусом на глубине 6,6–7,6 м (продолжительность дрейфа 9 часов), двигался примерно с такой же скоростью, что и дрейфтер, расположенный выше. Это свидетельствует о наличии квазиоднородного течения в слое от поверхности до 8 м, что подтверждается и вертикальными профилями скорости по данным ADCP (*рис. 3*). Дрейфтер с парусом, заглубленным на 15 метров (продолжительность дрейфа 27 часов), двигался намного медленнее других. Средняя скорость его дрейфа составила всего 0,07 м/с.

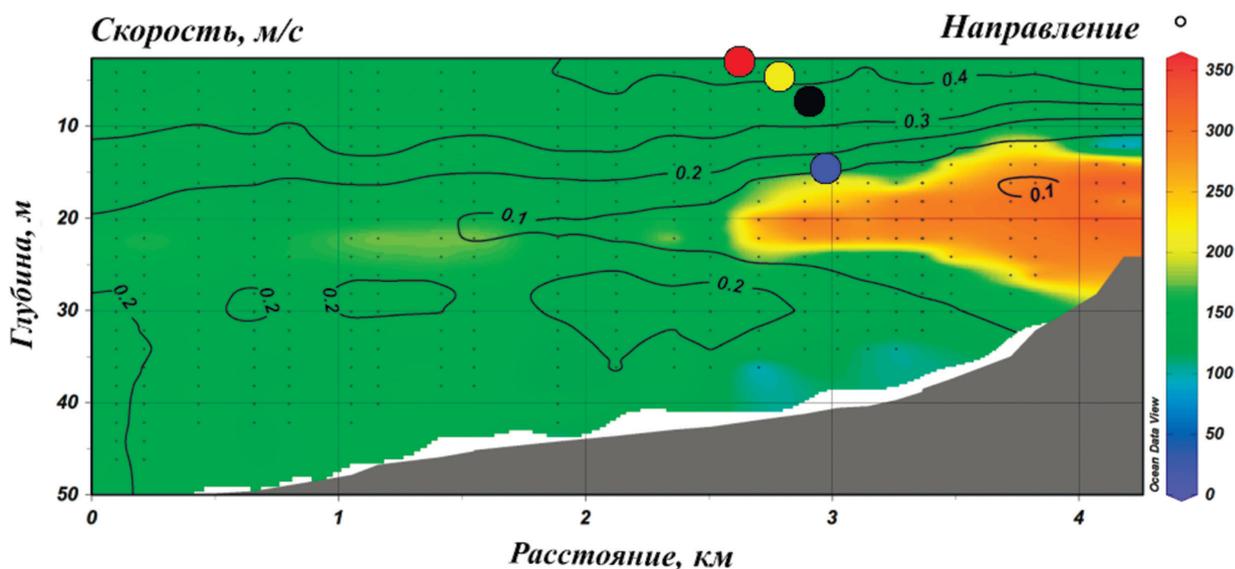


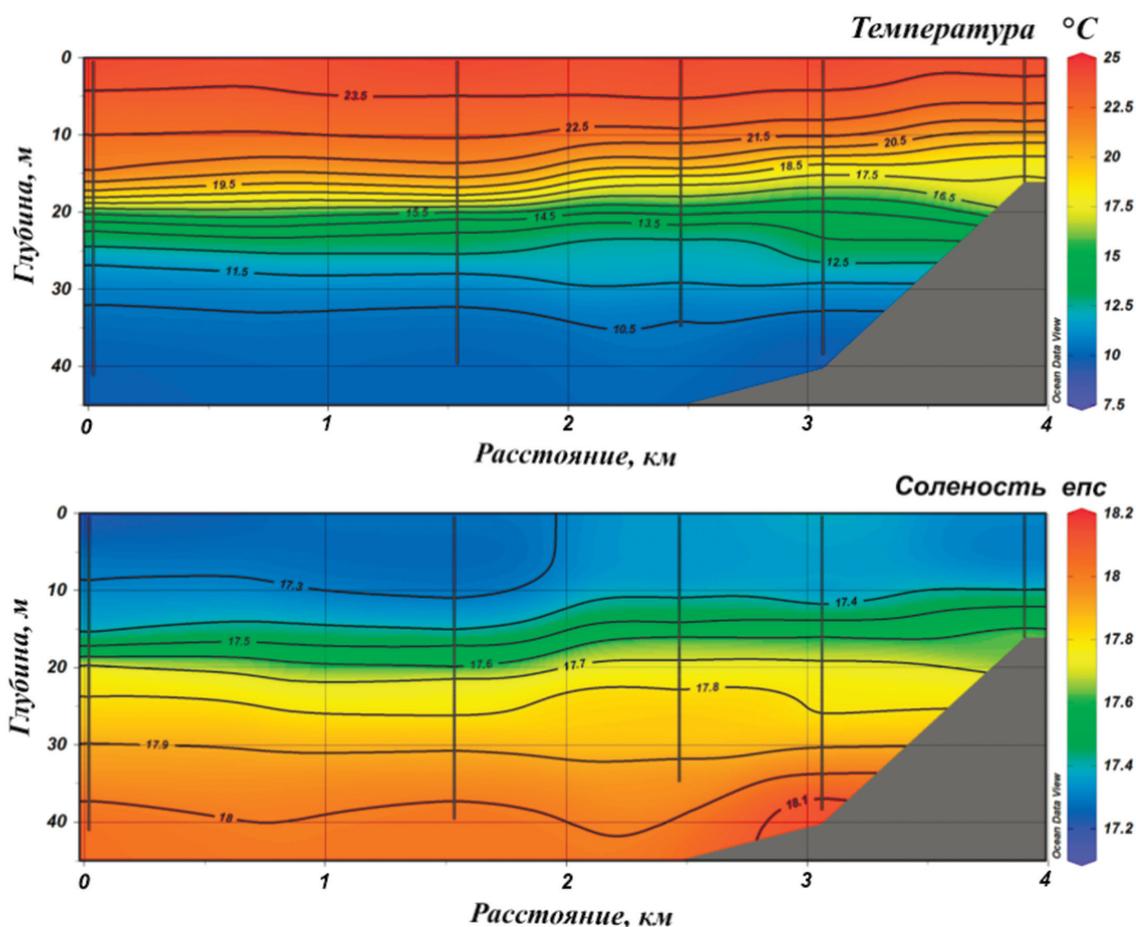
Рис. 3. Вертикальное распределение модуля скорости и направления течений по данным буксировки ADCP. Точками показаны координаты запуска дрейфтеров. Цвет точки запуска соответствует цвету траектории дрейфа каждого из буев из рис. 2

По данным метеостанции г. Геленджик во время эксперимента ветер был неустойчивый, слабый, скорость его не превышала 2–3 м/с, что не позволяет говорить о формировании ветрового течения на верхних горизонтах. Наблюдаемые по данным измерений скорости более 0,4 м/с, возможно, являются частью крупного антициклонического вихря или обусловлены градиентом плотности. По траекториям движения дрейфтеров зафиксирован угол поворота течения  $8^\circ$  в слое 1–15 м, что не позволяет говорить о классическом экмановском развороте течения с глубиной (рис. 2). В течение 30 часов по данным дрейфтеров скорость и направление течения практически не изменялись, что свидетельствует о неинерционном характере течений и квазиламинарности потока.

На рис. 3 представлено распределение скорости и направления течений 3 июля по данным съемки ADCP, а также показаны точки запуска дрейфтеров. Течение, по данным ADCP, было прижато к берегу, незначительно ослабевая в мористой части профиля. Скорость течения равномерно уменьшалась с глубиной до горизонта 20 м, где наблюдался минимум скорости (0,1 м/с) по данным ADCP. На глубине залегания изотакхи 0,1 м/с двигался дрейфтер с заглубленным на 15 метров парусом. Как видно из рис. 2 и 3, разница в абсолютных скоростях дрейфтера и ADCP составляет не более 0,03 м/с. Однако в поле направления течения разница между направлением движения дрейфтера на глубине 15–16 м и направлением, полученным по данным ADCP, составляет  $30^\circ$ – $45^\circ$ . Подобная картина, по мнению авторов, объясняется тем, что ADCP хуже определяет направление вектора течений при незначительных абсолютных величинах скорости потока в связи с несовершенством метрологических свойств магнитного компаса прибора и начальной погрешностью метода при буксировке ADCP на относительно больших скоростях ( $> 1$  м/с).

Область пониженных скоростей течений и смены их направления также прижата к берегу и локализована на глубине 20 м. При движении в мористую часть данная область практически пропадает.

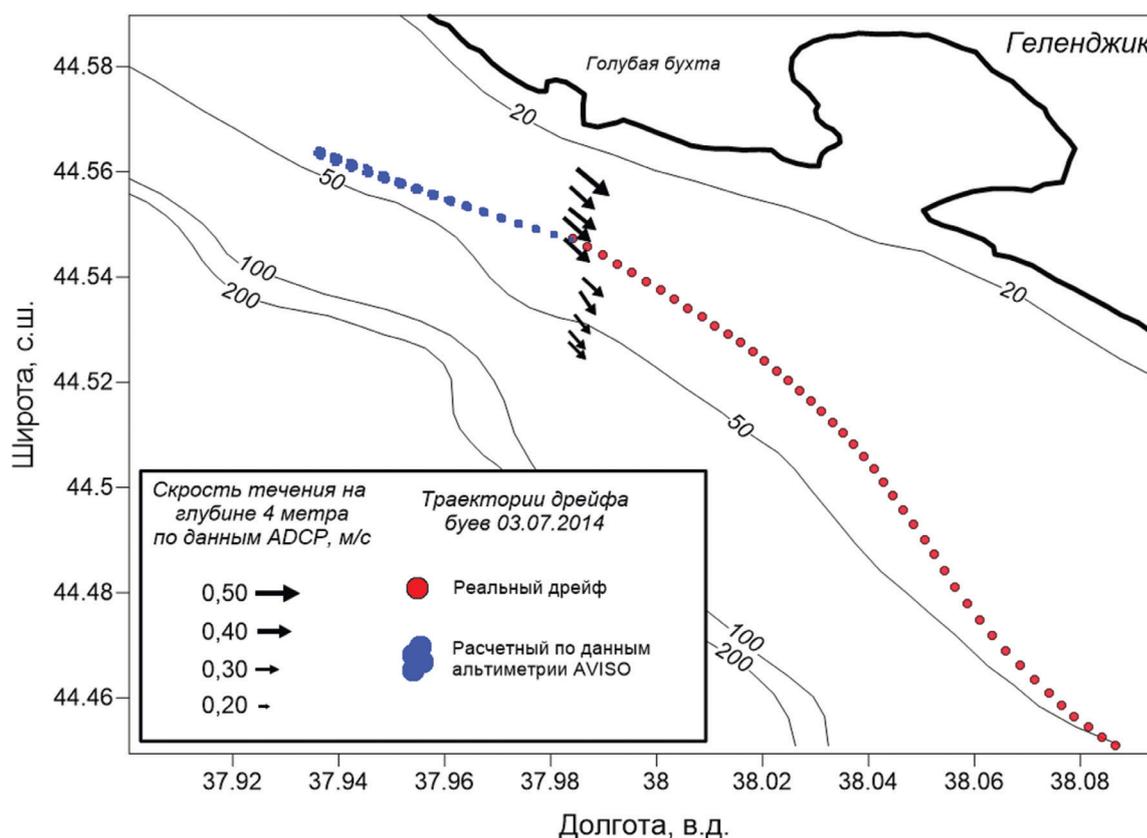
Как уже было сказано выше, во время буксировки ADCP проводилась съемка термохалинной структуры при помощи современного CTD-зонда. Картина вертикальной термохалинной структуры вод в день эксперимента представлена на *рис. 4*. Особенностью распределения температуры и солёности вод является присутствие мощного сезонного термоклина и галоклина, расположенных на глубине 15–20 метров. При продвижении к берегу градиентная зона несколько расширяется и занимает область глубин в диапазоне 10–25 м. Градиент температуры в термоклине составляет до  $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{м}$  на удалении от берега и  $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{м}$  в прибрежном районе; градиент солёности  $\sim 0,04\text{ епс}/\text{м}$  на всем протяжении разреза. Примечательно, что характерный подъем и расширение области термоклина и галоклина на ближних к берегу станциях совпадают как с границей смены направлений течений, так и с областью уменьшения абсолютных скоростей потока. Возможно, это следствие слабовыраженного динамического эффекта наблюдаемых вдольбереговых течений (*рис. 3*): юго-восточный поток в верхнем слое, отклоняясь вправо, вызывает отжимной эффект, а противоположное течение на глубине прижимается к берегу, вызывая небольшое расширение термоклина.



*Рис. 4. Распределение температуры и солёности вод на разрезе в ходе буксировки ADCP 3 июля 2014 года*

## Сопоставление дрейфа плавучего объекта, рассчитанного по программе KUST, с данными натурных измерений

На *рис. 5* приведено сравнение данных ADCP на горизонте 4 м, дрейтера с парусом, расположенным на глубине 0,5–1,5 м, и дрейфа плавучего объекта, рассчитанного в программе KUST с использованием альтиметрической информации из архива AVISO (Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data).

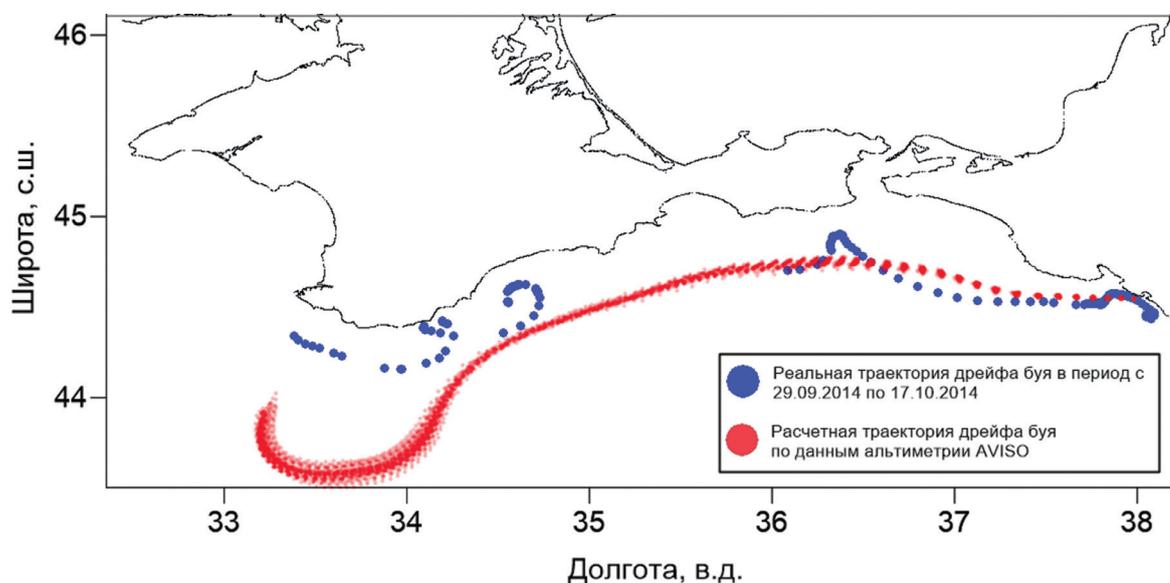


*Рис. 5. Сравнение траектории движения дрейтера и расчетного дрейфа плавучего объекта по данным альтиметрии AVISO в программе KUST*

Время начала расчетного дрейфа соответствует времени запуска дрейтера в ходе эксперимента (10:20 3 июля 2014 года; 37,984 в.д., 44,547 с.ш.), а каждая точка соответствует положению плавучего объекта с 30-минутным интервалом относительно начальной точки. Дискретность передачи положения с реального буя составляла 10 минут.

По результатам сравнения рассчитанный по модели дрейф кардинально отличается от реального не только по абсолютным значениям скоростей (скорость движения поверхностного буя в 4 раза выше), но и по направлению – практически на 180°, что позволяет сделать вывод о невозможности применения используемой версии программного пакета KUST в прибрежной зоне. Во время эксперимента скорость ветра не превышала 3 м/с, следовательно величина дрейфовой (ветровой) компоненты скорости не могла превышать 6 см/с.

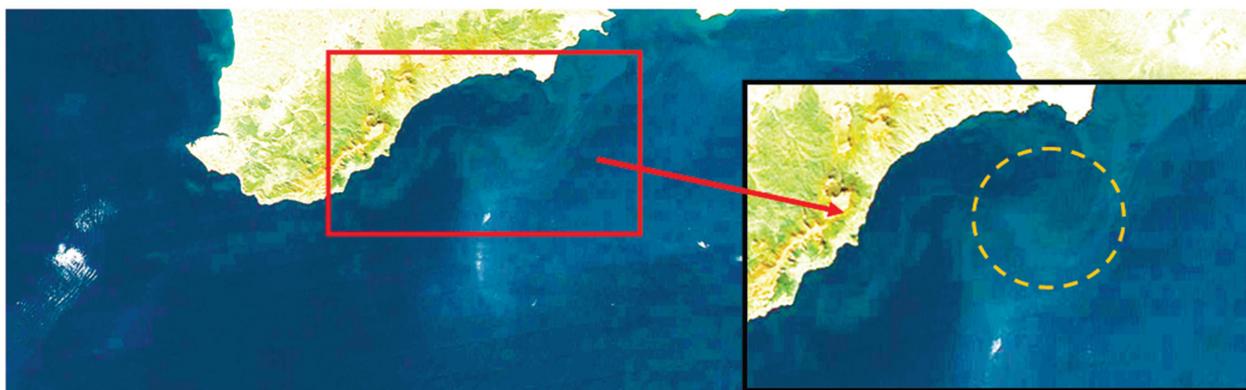
По результатам эксперимента 29 сентября – 17 октября 2014 года была получена траектория движения дрейфтера с парусом на глубине 3–4 метра в открытой акватории Черного моря. Часть данных дрейфа отсутствует ввиду потери дрейфтером сигнала связи со спутниками и выхода за пределы зоны покрытия GSM связью. Дрейфтер был запущен в районе г. Геленджик (15:00 29 сентября 2014 года; 37,983 в.д., 44,546 с.ш.) и вышел за пределы прибрежной зоны. На *рис. 6* видно, что скорость движения дрейфтера значительно увеличилась после его попадания в ОЧТ. Участок от 37,5° в.д. до 36,5° в.д. был пройден за 36 часов, что соответствует скорости движения ~ 60 см/с. Далее, преодолев открытый участок моря, дрейфтер попал в антициклонический вихрь в районе полуострова Крым – траектория его движения представляет собой классическую циклоиду с диаметром петли около 15 км. Скорость перемещения центра вихря по предварительным оценкам составила ~ 20 см/с, один оборот вихрь совершил за 55 часов. Далее дрейфтер продолжил свое движение вдоль южного побережья Крыма, пока не закончился ресурс батарей.



*Рис. 6. Траектория дрейфтера и расчетная траектория движения плавучего объекта, полученная по данным альтиметрии AVISO в программе KUST*

На *рис. 7* представлен фрагмент спутникового изображения Modis Aqua, с разрешением 250 м, полученного 11 октября 2014 года, на котором отчетливо виден антициклонический вихрь с диаметром ~ 30 км у южного побережья Крыма. Подобная вихревая структура описывается и движением дрейфтера (*рис. 6*). Центр вихря на изображении Modis Aqua расположен в ~ 30 км к северо-востоку от первой зафиксированной дрейфтером петли, но надо учесть, что спутниковая съемка была проведена на 36 часов раньше. Учитывая расчетную скорость перемещения вихря, можно предположить, что и на спутниковом изображении, и по данным дрейфтера фиксируется один и тот же вихрь.

Для данного эксперимента был также произведен расчет дрейфа плавучего объекта с использованием программы KUST с дискретностью 6 часов. На участке движения дрейфтера



*Рис. 7. Фрагмент спутникового изображения Modis Aqua от 11.10.2014.  
Желтый пунктир – предполагаемый контур антициклонического вихря*

в ОЧТ расчетные и реальные траектории дрейфа похожи как по генеральному направлению, так и по абсолютным величинам скорости. По-видимому, течение на данном участке в большей степени геострофическое, без влияния субмезомасштабных вихрей или иных структур. Примечательно, что в районе  $36,5^\circ$  в.д. дрейфтер попал в некую структуру, заметно замедлив дрейф и изменив направление движения, однако расчетная траектория дрейфа влияния данной структуры на себе не испытала. Сила ветра на протяжении всего дрейфа буя не превышала 10 м/с и была максимальна в первые дни эксперимента. Дрейфовая (ветровая) компонента течения по предварительным оценкам составляла порядка  $\sim 20$  см/с.

Дрейф вдоль южного побережья Крыма, осложненный наличием вихревых структур, запечатленных на спутниковом изображении, и видимый на траектории движения дрейфтера, не был отражен в расчетном дрейфе плавучего объекта. Однако общий вид траектории движения дрейфтера и виртуального плавучего объекта в целом совпадают, что говорит о преобладании геострофической компоненты переноса над дрейфовой (ветровой).

### **Заключение**

Анализ результатов синхронных измерений течений при помощи буксируемого профилографа течений ADCP и лагранжевых дрейфтеров в прибрежной зоне Черного моря показал следующее. Данные о морских течениях, полученные дрейфтерами и профилографом течений ADCP, в целом совпадают и во многом дополняют друг друга. Отклонения по магнитуде при общей скорости течения более 0,1 м/с между обоими средствами измерений составляют не более 0,05 м/с и  $5^\circ$  по направлению. При скоростях течения менее 0,1 м/с зафиксировано некорректное измерение буксируемым ADCP направления течения, что связано, в первую очередь, со значительной скоростью движения маломерного судна и несовершенством магнитного компаса прибора.

И по данным дрейфтеров, и по данным акустического профилографа течений наблюдается значительное уменьшение скоростей течений в зоне термоклина. При приближении

к берегу зона термоклина расширяется и в ней наблюдается смена направления течения по данным ADCP. Дрифтер с парусом на глубине 15–16 метров в пограничной зоне подобной смены течений не обнаружил.

Наблюдаемая картина поля течений в исследуемом регионе с характерными величинами скоростей и продолжительностью своего существования позволяет говорить о наличии в ходе эксперимента потока вод, прижатого к берегу и противоположного по направлению Основному черноморскому течению.

При сравнении траекторий движения дрейфтеров и рассчитанных траекторий дрейфа плавучего объекта выявлено, что использование программного пакета KUST в прибрежной зоне моря невозможно. Это связано, скорее всего, с необходимой дополнительной обработкой данных спутниковой альтиметрии для акваторий, прилегающих непосредственно к береговой черте, что в настоящее время в модели не проводится. В то же время, эксперимент в открытой части моря показал, что программный пакет KUST с достаточной степенью достоверности может быть использован для оценки дрейфа плавучих объектов. По данным эксперимента установлено, что 13–15 октября 2014 года у восточного побережья п-ова Крым наблюдался антициклонический вихрь, присутствие которого подтверждается как траекторией движения дрейфтера, так и наличием аналогичных структур на спутниковом изображении Modis Aqua от 11 октября 2014. Восстановленная в программе KUST траектория дрейфа плавучего объекта не отражает влияние указанного вихря, несмотря на то, что модель вихреразрешающая. Данное несоответствие требует дальнейшего исследования.

Использование данных автономных дрейфующих буев позволяет существенно дополнить и расширить возможности подспутниковых измерений и верифицировать данные дистанционного зондирования в прибрежной зоне.

Экспедиционные работы выполнены при финансовой поддержке гранта РФФИ № 14-17-00382, анализ результатов измерений выполнен при финансовой поддержке гранта РФФИ № 14-17-00555. Авторы статьи благодарят Арсения Кубрякова (Морской гидрофизический институт, г. Севастополь) за помощь в освоении программного пакета KUST.

## Литература

1. Журбас В.М., Зацепин А.Г., Григорьева Ю.В., Еремеев В.Н., Кременецкий В.В., Мотыжьев С.В., Поярко С.Г., Пулейн П.-М., Станичный С.В., Соловьев Д.М. Циркуляция вод и характеристики разномасштабных течений в верхнем слое Черного моря по дрейфтерным данным // *Океанология*. 2004. Т. 44. № 1. С. 34–48.
2. Зацепин А.Г., Баранов В.И., Кондрашов А.А., Корж А.О., Кременецкий В.В., Островский А.Г., Соловьев Д.М. Субмезомасштабные вихри на кавказском шельфе Черного моря и порождающие их механизмы // *Океанология*. 2011. Т. 51. № 4. С. 592–605.
3. Зацепин А.Г., Корж А.О., Кременецкий В.В., Островский А.Г., Поярко С.Г., Соловьев Д.М. Изучение гидрофизических процессов на шельфе и верхней части континентального склона Черного моря с использованием традиционных и новых методов измерений // *Океанология*. 2008. Т. 48. № 4. С. 510–519.
4. Зацепин А.Г., Кременецкий В.В., Пиотух В.Б., Поярко С.Г., Ратнер Ю.Б., Соловьев Д.М., Станичная Р.Р., Станичный С.В., Якубенко В.Г. Формирование прибрежного плотностного течения из-за пространственно-неоднородного ветрового воздействия // *Океанология*. 2008. Т. 48. № 2. С. 176–192.
5. Зацепин А.Г., Пиотух В.Б., Корж А.О., Куклева О.Н., Соловьев Д.М. Изменчивость поля течений в прибрежной зоне Черного моря по измерениям донной станции ADCP // *Океанология*. 2012. Т. 52. № 5. С. 629–642.
6. Зацепин А.Г., Островский А.Г., Кременецкий В.В., Низов С.С., Пиотух В.Б., Соловьев В.А., Швоев Д.А., Цибульский А.Л., Куклев С.Б., Куклева О.Н., Москаленко Л.В., Подымов О.И., Баранов В.И., Кондрашов А.А., Корж А.О., Кубряков А.А., Соловьев Д.М., Станичный С.В. Подспутниковый полигон для изучения

- гидрофизических процессов в шельфово-склоновой зоне Черного моря // Известия АН - ФАО. 2014. № 1. С. 16–29.
7. *Калашиникова Н.А., Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Серебряный А.Н.* Влияние вихревых структур на распространение загрязнений в прибрежной зоне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С. 228–240.
  8. *Кривошея В.Г., Москаленко Л.В., Титов В.Б.* К вопросу о режиме течений на шельфе Северо-Кавказского побережья Черного моря // Океанология. 2004. Т. 44. № 3. С. 358–363.
  9. *Лаврова О. Ю., Костяной А. Г., Лебедев С. А., Митягина М. И., Гинзбург А. И., Шеремет Н. А.* Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН. 2011. 470 с.
  10. *Лаврова О.Ю., Краюшкин Е.В., Соловьев Д.М., Голенко М.Н., Голенко Н.Н., Калашиникова Н.А., Демидов А.Н.* Влияние ветрового воздействия и гидродинамических процессов на распространение вод Калининградского залива в акватории Балтийского моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 4. С. 76–99.
  11. *Лаврова О.Ю., Серебряный А.Н., Митягина М.И., Бочарова Т.Ю.* Подспутниковые наблюдения мелкомасштабных гидродинамических процессов в северо-восточной части Черного моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 4. С. 308–322.
  12. *Матвеев А.Я., Кубряков А.А., Боев А.Г., Бычков Д.М., Иванов В.К., Станичный С.В., Цымбал В.Н.* Моделирование растекания нефти в задаче радиолокационной многоугловой диагностики загрязнений морской поверхности // Исследование Земли из космоса. 2015. № 6 (в печати).
  13. *Мотыжев С.В., Лунев Е.Г., Толстошеев А.П.* Развитие дрейфтерных технологий и их внедрение в практику океанографических наблюдений в черном море и мировом океане // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: НПЦ «ЭКО-СИ-Гидрофизика». 2011. Вып. 24. С. 259–273.
  14. *Мысленков С.А., Зацепин А.Г., Сильвестрова К.П., Баранов В.И.* Использование дрейфующих буев и буксируемого профилографа для исследования течений на шельфе черного моря // Вестник московского университета. Серия 5. География. 2014. № 6. 73–80.
  15. *Мысленков С.А., Самсонов Т.Е.* Исследование течений на шельфе Черного моря с помощью ГНСС-мониторинга // Изв. Вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2014. № 3. С. 60–68.
  16. *Овчинников И.М., Титов В.Б.* Антициклоническая завихренность течений в прибрежной зоне Черного моря // Докл. АН СССР. 1990. Т. 314. № 5. С. 1236–1239.
  17. *Титов В.Б.* Характеристики Основного черноморского течения и прибрежных антициклонических вихрей в Российском секторе Черного моря // Океанология. 2002. Т. 42. № 5. С. 668–676.
  18. *Kubryakov A.A., Stanichny S.V.* Reconstruction of mean dynamic topography of the Black Sea for altimetry measurements *Izvestiya // Atmospheric and Oceanic Physics.* 2012. 48 (9). P. 973–979.
  19. *Lavrova O., Serebryany A., Bocharova T., Mityagina M.* Investigation of fine spatial structure of currents and submesoscale eddies based on satellite radar data and concurrent acoustic measurements // Proc. SPIE 8532. Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions. 2012. 85320L (October 19, 2012). doi:10.1117/12.970482.
  20. *Mullarney J., Henderson S.* A novel drifter designed for use with a mounted Acoustic Doppler Current Profiler in shallow environments // *Limnology and Oceanography: Methods.* 2013. Vol. 11. P. 438–449.
  21. *Ruiz S., Font J., Emelianov M., Isern-Fontanet J., Millot C., Salas J., Taupier-Letage J.* Deep structure of an open sea eddy in the Algerian Basin // *Journal of Marine Systems.* 2002. Vol. 33. P. 179–195.
  22. *Stanichny S.V., Kubryakov A.A., Soloviev D.M.* Parameterization of surface wind-driven currents in the Black Sea using drifters, wind and altimetry data // *Ocean Dynamics.* 2015 (in press).
  23. *Tolstosheev A.P.* A method of estimation of the results of reconstruction of the trajectories of drifting buoys // *Physical Oceanography.* 2010. Т. 19. № 6. P. 358–365.

# Comparison of drifter and ADCP data in a subsatellite test site in the Black Sea

K.P. Silvestrova<sup>1</sup>, E.V. Krayushkin<sup>2,3</sup>, S.A. Myslenkov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia*  
*E-mail: ksenia.ocean@yandex.ru*

<sup>2</sup>*M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*  
*E-mail: stasocean@gmail.com*

<sup>3</sup>*Space Research Institute RAS, Moscow, Russia*  
*E-mail: box\_evk@mail.ru*

The paper investigates sea currents in a subsatellite test site near a town of Gelendzhik in the coastal zone of the Black Sea using drifters and vessel-mounted ADCP. During the experiment, underwater sails of the drifters were deepened to different depths so that their data could be compared with vertical profiles from ADCP. For current magnitudes less than 0.1 m/s, the ADCP yielded significant errors in current direction estimation. In the paper, a comparison of in situ measurements and remote sensing Modis Terra/Aqua and OLI Landsat-8 data, as well as numerical modeling results by the KUST software is performed. It is shown that currents calculated by satellite altimetry method for open sea regions agree well with the real ones obtained by the drifters. However, a submesoscale vortex formation near the Crimea shore was not resolved by the KUST software. The study demonstrates poor results of KUST in the coastal zone. Oceanographic expeditions still remain the only source of correct data on sea.

**Keywords:** drifter, ADCP, sea currents, Black Sea, remote sensing, satellite altimetry, AVISO, KUST

## References

1. Zhurbas V.M., Zatsepin A.G., Grigor'eva Yu.V., Ereemeev V.N., Kremenetskii V.V., Motyzhev S.V., Poyarkov S.G., Pulein P.-M., Stanichnyi S.V., Solov'ev D.M. Tsirkulyatsiya vod i kharakteristiki raznomasshtabnykh tekhenii v verkhnem sloe Chernogo morya po drifternym dannym (Water circulation and characteristics of currents of different scales in the upper layer of the Black Sea from drifter data), *Okeanologiya*, 2004, Vol. 44, No. 1, pp. 34–48.
2. Zatsepin A.G., Baranov V.I., Kondrashov A.A., Korzh A.O., Kremenetskii V.V., Ostrovskii A.G., Solov'ev D.M. Submezomasshtabnye vikhri na kavkazskom shel'fe Chernogo morya i porozhdayushchie ikh mekhanizmy (Submesoscale eddies at the Caucasus Black Sea shelf and the mechanisms of their generation), *Okeanologiya*, 2011, Vol. 51, No. 4, pp. 592–605.
3. Zatsepin A.G., Korzh A.O., Kremenetskii V.V., Ostrovskii A.G., Poyarkov S.G., Solov'ev D.M. Izuchenie gidrofizicheskikh protsessov na shel'fe i verkhnei chasti kontinental'nogo sklona Chernogo morya s ispol'zovaniem traditsionnykh i novykh metodov izmerenii (Studies of the hydrophysical processes over the shelf and upper part of the continental slope of the Black Sea with the use of traditional and new observation techniques), *Okeanologiya*, 2008, Vol. 48, No. 4, pp. 510–519.
4. Zatsepin A.G., Kremenetskii V.V., Piotukh V.B., Poyarkov S.G., Ratner Yu.B., Solov'ev D.M., Stanichnaya R.R., Stanichnyi S.V., Yakubenko V.G. Formirovanie pribrezhnogo plotnostnogo techeniya iz-za prostranstvenno-neodnorodnogo vetrovogo vozdeistviya (Formation of the coastal current in the Black Sea caused by spatially inhomogeneous wind forcing upon the upper quasi-homogeneous layer), *Okeanologiya*, 2008, Vol. 48, No. 2, pp. 176–192.
5. Zatsepin A.G., Piotukh V.B., Korzh A.O., Kukleva O.N., Solov'ev D.M. Izmenchivost' polya tekhenii v pribrezhnoi zone Chernogo morya po izmereniyam donnoi stantsii ADCP (Variability of currents in the coastal zone of the Black Sea from long-term measurements with a bottom mounted ADCP), *Okeanologiya*, 2012, Vol. 52, No. 5, pp. 629–642.
6. Zatsepin A.G., Ostrovskii A.G., Kremenetskii V.V., Nizov S.C., Piotukh V.B., Solov'ev V.A., Shvoev D.A., Tsubul'skii A.L., Kuklev S.B., Kukleva O.N., Moskalenko L.V., Podymov O.I., Baranov V.I., Kondrashov A.A., Korzh A.O., Kubryakov A.A., Solov'ev D.M., Stanichnyi S.V. Podsputnikovyi poligon dlya izucheniya gidrofizicheskikh protsessov v shel'fovo-sklonovoi zone Chernogo morya (Subsatellite polygon for studying hydrophysical processes in the Black Sea shelf-slope zone), *Izvestiya AN - FAO*, 2014, Vol. 1, pp. 16–29.
7. Kalashnikova N.A., Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., Serebryanyi A.N. Vliyaniye vikhrevykh struktur na rasprostraneniye zagryaznenii v pribrezhnoi zone (Influence of the vortex structures on the spread of pollution in the coastal zone), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 3, pp. 228–240.
8. Krivosheya V.G., Moskalenko L.V., Titov V.B. K voprosu o rezhime tekhenii na shel'fe Severo-Kavkazskogo poberezh'ya Chernogo morya (On the current regime over the shelf near the north Caucasian coast of the Black Sea), *Okeanologiya*, 2004, Vol. 44, No. 3, pp. 358–363.
9. Lavrova O. Yu., Kostyanoi A. G., Lebedev S. A., Mityagina M. I., Ginzburg A. I., Sheremet N. A. *Kompleksnyi sputnikovyi monitoring morei Rossii* (Complex satellite monitoring of the Russian seas), Moscow: IKI RAS, 2011, 470 p.

10. Lavrova O.Yu., Krayushkin E.V., Solov'ev D.M., Golenko M.N., Golenko N.N., Kalashnikova N.A., Demidov A.N. Vliyanie vetrovogo vozdeistviya i gidrodinamicheskikh protsessov na rasprostranenie vod Kaliningradskogo zaliva v akvatorii Baltiiskogo morya (Influence of wind and hydrodynamic processes on propagation of the Vistula Lagoon waters into the Baltic Sea), *Sovremennyye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 4, pp. 76–99.
11. Lavrova O.Yu., Serebryanyi A.N., Mityagina M.I., Bocharova T.Yu. Podsputnikovye nablyudeniya melkomasshtabnykh gidrodinamicheskikh protsessov v severo-vostochnoi chasti Chernogo morya (Subsatellite observations of small-scale hydrodynamic processes in the northeastern Black Sea), *Sovremennyye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 4, pp. 308–322.
12. Matveev A.Ya., Kubryakov A.A., Boev A.G., Bychkov D.M., Ivanov V.K., Stanichny S.V., Tsymbal V.N. Modelirovanie rastekaniya nefti v zadache radiolokatsionnoi mnogouglovoi diagnostiki zagryaznenii morskoi poverkhnosti, (Oil spread modeling for radar multi-view-angle diagnostics of sea surface pollution), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2015, No. 6 (in press).
13. Motyzhev S.V., Lunev E.G., Tolstoshev A.P. Razvitie drifternykh tekhnologii i ikh vnedrenie v praktiku okeanograficheskikh nablyudeniiv v chernom more i mirovom okeane, Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa, Sevastopol': *NPTs EKOSI-Gidrofizika*, 2011, Vol. 24, pp. 259–273.
14. Myslenkov S.A., Zatsepin A.G., Sil'vestrova K.P., Baranov V.I. Ispol'zovanie dreifuyushchikh buev i buksiruemogo profilografa dlya issledovaniya techenii na shel'fe chernogo morya (Coastal dynamics of the Black Sea shelf zone investigated by drifting buoys and towed ADCP), *Vestnik moskovskogo universiteta*, Vol. 5, 2014, No. 6, 73–80.
15. Myslenkov S.A., Samsonov T.E. Issledovanie techenii na shel'fe Chernogo morya s pomoshch'yu GNSS-monitoringa (GNSS monitoring in the investigation of shelf currents in the Black Sea), *Izv. Vuzov. Geodeziya i aerofotos'emka*, 2014, No. 3, pp. 60–68.
16. Ovchinnikov I.M., Titov V.B. Antitsiklonicheskaya zavikhrennost' techenii v pribrezhnoi zone Chernogo morya (Anticyclonic eddies of currents in the coastal area of the black sea), *Dokl. AN SSSR*, 1990, Vol. 314, No. 5, pp. 1236–1239.
17. Titov V.B. Kharakteristiki Osnovnogo chernomorskogo techeniya i pribrezhnykh antitsiklonicheskikh vikhrei v Rossiiskom sektore Chernogo morya (Characteristics of the main black sea current and near-shore anticyclonic eddies in the russian sector of the black sea), *Okeanologiya*, 2002, Vol. 42, No. 5, pp. 668–676.
18. Kubryakov A.A., Stanichny S.V. Reconstruction of mean dynamic topography of the Black Sea for altimetry measurements, *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics*, 2012, Vol. 48 (9), pp. 973–979.
19. Lavrova O., Serebryanyi A., Bocharova T., Mityagina M. Investigation of fine spatial structure of currents and submesoscale eddies based on satellite radar data and concurrent acoustic measurements, *Proc. SPIE 8532, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2012*, 85320L (October 19, 2012); doi:10.1117/12.970482.
20. Mullarney J., Henderson S. A novel drifter designed for use with a mounted Acoustic Doppler Current Profiler in shallow environments, *Limnology and Oceanography: Methods*, 2013, Vol. 11, pp. 438–449.
21. Ruiz S., Font J., Emelianov M., Isern-Fontanet J., Millot C., Salas J., Taupier-Letage J. Deep structure of an open sea eddy in the Algerian Basin, *Journal of Marine Systems*, 2002, Vol. 33, pp. 179–195.
22. Stanichny S.V., Kubryakov A.A., Soloviev D.M. Parameterization of surface wind-driven currents in the Black Sea using drifters, wind and altimetry data, *Ocean Dynamics*, 2015 (in press).
23. Tolstoshev A.P. A method of estimation of the results of reconstruction of the trajectories of drifting buoys, *Physical Oceanography*, 2010, Vol. 19, No. 6, pp. 358–365.